

# レシーバ関数の安定した計算手法の検討

正会員 山本 健史\*1 同 高橋 広人\*2  
同 福和 伸夫\*3 同 飛田 潤\*4

レシーバ関数      フーリエスペクトル比      PS-P 時間  
ウォーターレベル法      スペクトルウィンドウ法      伝達関数推定法

## 1.はじめに

レシーバ関数は、地震波の初動部分の水平/上下フーリエスペクトル比をフーリエ逆変換することで計算できる。レシーバ関数から得られる地震波の P 波と PS 変換波の到達時間差 PS-P 時間は、地盤の卓越周期と強い相関があることが報告されている<sup>1)</sup>。また、レシーバ関数から抽出された PS-P 時間や、その計算過程で求められた水平/上下スペクトル比を用いて、地盤の S 波速度構造を逆解析できる可能性も示されている。大深度の S 波速度構造の調査は莫大な費用がかかるためあまり行われておらず、地表面の地震記録から地盤構造を推定できる意義は大きい。

しかし、地震動の波形記録から計算したレシーバ関数はばらつきが大きく、PS-P 時間の正確な把握が困難となる場合がある。本研究ではレシーバ関数を計算する際に、ノイズを低減するためのいくつかの手法について、その効果を検討する。

## 2.検討対象の地盤と地震記録

検討には KiK-net の GIFH09 の地震観測記録を使用した。表 1 に使用した地震を示す。図 1 には PS 検層の結果を示す。この地点では、Vs が 3000m/s を超える地震基盤までの速度構造が調査されているためレシーバ関数の理論値を計算することができ、提案する手法の計算値との対比も検討できる。

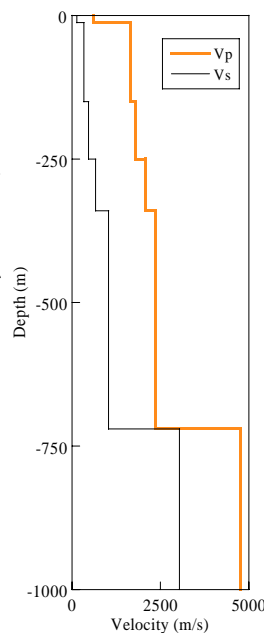


図 1 GIFH09 の速度構造

表 1 検討に使用した地震

case	Date	Mj	Depth (km)	Distance (km)
1	99.11.29	4.7	51	34
2	00.10.31	5.5	44	115
3	01.10.23	4.9	40	98
4	04.09.05	6.9	38	249
5	04.09.05	7.4	44	240
6	04.09.07	6.4	41	220
7	04.09.08	5.5	40	232
8	04.09.08	6.5	36	244

## 3.レシーバ関数の計算の問題点と改善策

### 3.1 レシーバ関数の計算法と問題点

本研究のレシーバ関数は、P 波初動の到達後 5 秒間の地震波形を用いて計算した。このとき小林らの研究<sup>1)</sup>を参考に、スペクトル比に対して 1Hz から 5Hz のバンドパスフィルタ処理を行った上でフーリエ逆変換を行っている。

レシーバ関数の計算では、地表面応答のごく短い時間のデータからフーリエスペクトルを計算するためスペクトルの変動が大きく、振幅がゼロ近くまで落ち込む周波数ができる場合がある。このような周波数が上下成分に存在すると、フーリエスペクトル比に本来の特性ではない鋭いピークが現れる可能性があり、フーリエ逆変換後のレシーバ関数に悪影響をもたらすと考えられる。従来の研究では、複数の地震記録からそれぞれ計算されたレシーバ関数を重ね合わせて平均化することで、ノイズを打ち消す方法が多く用いられている。本研究では、スペクトルの不安定性を補い、安定したレシーバ関数を計算する手法を検討する。

### 3.2 ウォーターレベル法

上下成分のスペクトルの谷に対し、下限値を決めてスペクトルを切り上げる手法で、理学系の地震研究分野でレシーバ関数を計算する際にしばしば用いられる<sup>2)</sup>。しかし、この手法は作為的にスペクトル比を歪ませるため、レシーバ関数まで歪む可能性がある。本研究では、1Hz から 6Hz の間での最大値の 1/10 を下限値として計算した。

### 3.3 スペクトルウィンドウ法

スペクトルウィンドウによる平滑化を行うことによって、スペクトルの谷をなくす手法である。この手法は、各地震記録で周波数方向に統計的な平均化を行うため、計算結果の歪みは小さくなると考えられる。ここでは、0.5Hz 幅の Parzen window を用いた。

### 3.4 統計的な伝達関数推定法

入力と出力の両方にノイズが含まれる可能性があるときに有効とされる伝達関数の推定法<sup>3)</sup>を適用する手法である。平均エネルギー・スペクトルと平均クロススペクトルから(1)式に基づいて、スペクトル比を計算する。ここでは、入力 X と出力 Y に対し、地表の上下動と水平動をそれぞれ当てはめて、スペクトル比を求める。

$$H_v(\omega) = \frac{S_{xy}(\omega)}{\sqrt{S_{xx}(\omega)}\sqrt{S_{yy}(\omega)}} \quad (1)$$

計算では、振幅の大きな地震記録による影響が支配的にならないよう、各記録を RMS 値で基準化している。

この手法では複数の記録を統計的に平均化するため安定したスペクトル比を計算でき、スペクトル比の乱れがレシーバ関数に及ぼす影響を低減できると考えられる。

## 5. 検討結果

図2 a)、b)に、検討に用いた8個の地震のスペクトル、水平/上下スペクトル比を示す。一部の記録では、スペクトルの谷に起因すると考えられるスペクトル比の鋭いピークが認められ、c)に示すレシーバ関数からは安定したピークを読み取り難い。d)、e)に示すウォーターレベル法とスペクトルウィンドウ法を用いたレシーバ関数では、効果に差はあるものの、やや安定したピークが認められる。

次に、レシーバ関数の理論値を図3に、8個の記録を重ね合わせて算出したレシーバ関数を図4に示す。地震基盤の上面で発生したPS変換波によるものと思われるPS-P時間はともに0.89秒で安定して得られた。手法による違いは無く、理論値と一致する。また、通常のレシーバ関数の単純平均法と伝達関数推定法の水平/上下スペクトル比を図5に示す。これらの2つの手法で傾向は変わらないが、振幅、位相ともに伝達関数推定法を用いたほうがばらつきが少ないことがわかる。

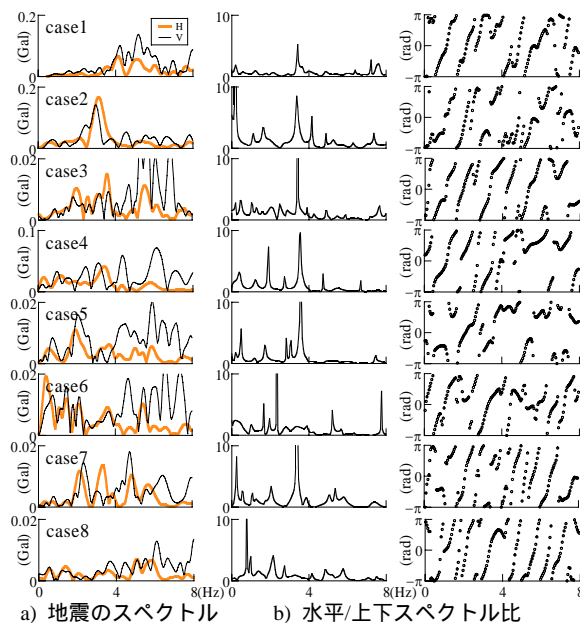


図2 各地震のスペクトルとレシーバ関数

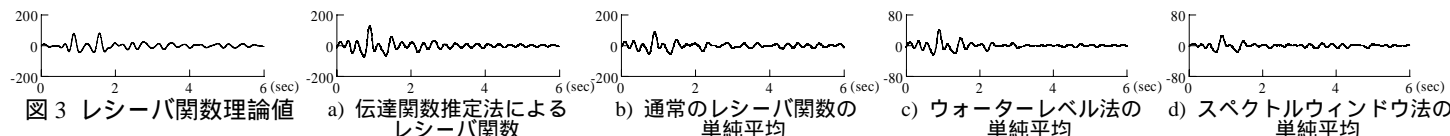


図3 レシーバ関数理論値

a) 伝達関数推定法によるレシーバ関数

b) 通常のレシーバ関数の単純平均

c) ウォーターレベル法の単純平均

d) スペクトルウィンドウ法の単純平均

図4 レシーバ関数の重ね合わせ (case1~8)

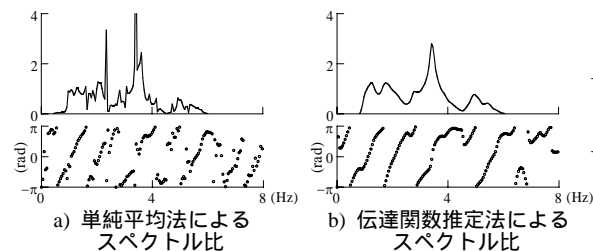
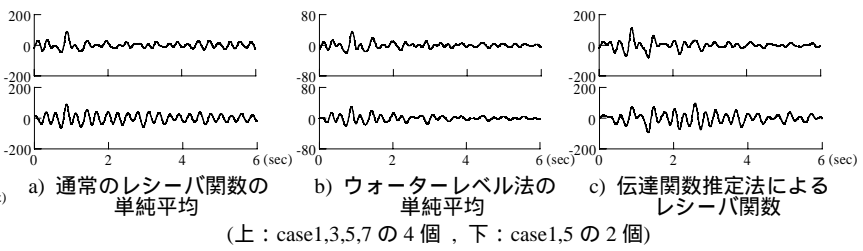


図5 水平/上下スペクトル比



(上: case1,3,5,7 の4個, 下: case1,5 の2個)

図6 重ね合わせの個数によるレシーバ関数の変化

重ね合わせるデータ数を減らした場合のレシーバ関数を図6に示す。4個重ね合わせた場合にはどれもPS-P時間を読み取ることができたが、2個の場合には単純平均法では4個の場合との差が顕著となった。

## 6. まとめ

安定したレシーバ関数を求めるために、上下成分のスペクトルの谷が与える悪影響を低減する手法の検討を行った。各地震記録に対し、ウォーターレベル法とスペクトルウィンドウ法の有効性が確認された。重ねあわせには伝達関数推定法を用いると、データ数が少なくても安定的にレシーバ関数を求められた。また、水平/上下スペクトル比も従来の方法より安定した結果が得られた。

謝辞: 検討には、防災科学技術研究所 KiK-net の記録を使用した。また、検討にあたり名古屋大学大学院卒業生の山内麻紀子氏から多大な助言を頂いた。記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 小林ほか: 日本建築学会構造系論文集 No505,45-52,1998.3
- 2) Langston: J. Geophys. Res. 84, 1979
- 3) 理論地震研究会: 地震動~その合成と波形処理,1994

\*1 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生  
\*2 (株)応用地質  
\*3 名古屋大学大学院環境学研究科・教授・工博  
\*4 名古屋大学大学院環境学研究科・助教授・工博

\*1 Graduate Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.  
\*2 OYO Corporation  
\*3 Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng  
\*4 Assoc. Prof., Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng